# بهسازی خاک واگرای شهرستان میناب با خاک سرخ جزیره هرمز و سیمان

عادل عساکره، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
عبدالرحیم اسدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: asakereh@hormozgan.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۹- پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵
صفحه ۲۰۶-۱۹۷

**چکیده**

***وجود خاک‌های واگرا در محل احداث پروژه‌های راهسازی به عنوان یکی از مشکلات ژئوتکنیکی شناخته شده است. این تحقیق به مطالعه خصوصیات مهندسی خاک‌های واگرای طبیعی و تثبیت شده می‌پردازد. خاک مورد مطالعه در محدوده نیمه واگرا-واگرا قرار می‌گیرد. در این پژوهش ابتدا پتانسیل واگرایی خاک مورد مطالعه (منطقه میناب در استان هرمزگان) توسط آزمایش‌های هیدرومتری دوگانه، کرامپ، پین هول و شیمیایی ارزیابی گردیده است. سپس، خاک واگرای مورد مطالعه با خاک سرخ جزیره هرمز و سیمان مخلوط شده و پس از پایان عمل‌آوری۱٤ روزه، برروی نمونه‌ها، آزمایش‌های پین هول، هیدرومتری، شیمیایی و حدود اتربرگ انجام گرفته و میزان تغییرات واگرایی و خواص خمیری خاک مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که به دلیل حضور $Fe^{+3}$ در خاک سرخ هرمز و $Ca^{+2}$ در سیمان، پتانسیل واگرایی به شدت کاهش یافته است. بر اساس آزمایش پین هول افزودن ۱۰ درصد خاک سرخ و بر اساس آزمایش هیدرومتری دوگانه افزودن ۱۰ درصد خاک سرخ و ۱/۵ درصد سیمان باعث از بین رفتن کامل پتانسیل واگرایی شده است.***

**واژه‌های کلیدی:** پتانسیل واگرایی، خاک سرخ هرمز ، سیمان، تبادل کاتیونی، تثبیت خاک واگرا

## ۱- مقدمه

خاک رس واگرا، به خاکی اطلاق می‌شود که حالت فیزیکی- شیمیایی دانه‌های آن به گونه‌ای است که در تماس با آب نسبتاً خالص، ذرات منفرد رس، پراکنده و از یکدیگر جدا می‌شود (فرزانه و تدین، ۱۳۸۵). یکی از موضوعاتی که همواره در انتخاب منابع قرضه ریزدانه باید مورد بررسی و توجه قرار گیرد، وجود انواع نمک‌های محلول و غیر محلول در این مصالح است. عدم توجه به این مهم، مشکلات زیادی را در اجرای سازه‌های آبی پدید می‌آورد و باعث تخریب و غیرقابل استفاده شدن این منابع می‌شود. باید در نظر داشت که کیفیت واگرایی باکیفیت مایع‌گرایی خاک‌های موسوم به رس سریع، که براثر لرزش به حالت مایع در می‌آیند، متفاوت است (Ouhadi and Goodarzi, 2005). همچنین برخی خاک‌های غیر چسبنده مانند لای‌ها یا ماسه‌های بسیار ریزدانه نیز قابلیت فرسایش بسیار زیادی دارند، لیکن روند فرسایش این خاک‌ها در اثر جریان آب صرفاً مکانیکی بوده و ارتباطی به پدیده واگرایی که مختص رس‌های ریزدانه است، ندارد. احداث سازه‌ها، بخصوص سازه‌های ژئوتکنیکی بر روی زمین‌های با خاک سست مانند خاک واگرا همواره یکی از مشکلات مهندسین ژئوتکنیک به شمار می‌رود. این مشکل به دلیل ضعف خاک از لحاظ مشخصات ژئوتکنیکی ازجمله مقاومت برشی کم خاک و تغییر شکل که موجب ایجاد نشست و حتی تورم نیز می‌شود، است. راهکارهای متفاوتی برای مقابله با این مشکل وجود دارد که یکی از این روش‌ها، بهسازی شیمیایی خاک با استفاده از افزودنی‌ها است. بهسازی شیمیایی به دلیل افزایش مقاومت برشی، افزایش مقاومت فشاری، کاهش حد روانی و همچنین فرآیند تثبیت

برای طولانی مدت، امروزه مورد استقبال قرارگرفته است. وجود خاصیت واگرایی در یک رس وابسته به متغیرهای مختلفی ازجمله کانی‌شناسی و ترکیبات شیمیایی ذرات رس، املاح محلول در آب حفره‌ای و املاح محلول در آب جاری از میان خاک است. رس‌های واگرا حتی در مقایسه با خاک‌های لای و ماسه ریزدانه، از فرسایش‌پذیری بیشتری در مقابل جریان آب برخوردارند. چنانچه خاک رس واگرا در آب غوطه‌ور شود، ذرات خاک رفتاری مانند دانه‌های مجزا از یکدیگر نشان می‌دهند، به این معنی که دانه‌های رس دارای حداقل نیروی جاذبه الکتروشیمیایی شده که موجب از بین رفتن چسبندگی و اتصال آن‌ها به ذرات دیگر خاک می‌شود. به نظر می‌رسد که تفاوت اصلی بین رس‌های واگرا و رس‌های معمولی، مقاومت در برابر فرسایش ناشی از ماهیت و تناسب کاتیون‌های محلول در آب موجود در بین خلل و فرج خاک است. در رس‌های واگرا، یون سدیم غالب است، حال آن‌که در رس‌های معمولی کاتیون‌های کلسیم، پتاسیم و منیزیم فزونی دارد (Sherard et al., 1976). پدیده واگرایی در خاک‌های رسی دارای یک مکانیزم پیچیده فیزیکی- شیمیایی است که با توجه به ساختار ویژه کانی‌های رسی، تأثیر پدیده اسمز، کیفیت جذب آن و تبادل یونی در رس‌ها موردبحث قرار داده می‌شود. ذرات کانی‌های رسی صفحه‌ای شکل بوده و سطح ویژه بزرگی دارند. سطح این ذرات حامل بار منفی است که عمدتاً در اثر جایگزینی اتم‌های سیلیسیم و آلومینوم به‌وسیله اتم‌های با ظرفیت کم‌تر در واحد بنیانی رس، به وجود می‌آید. وجود بار منفی در سطح کانی‌های رس باعث جذب یون‌های مثبت و رانده شدن یون‌های منفی از سطح این ذرات می‌شود (عسکری و فاخر، ۱۳۷۲). طبقه‌بندی نظری و آزمایش‌های آزمایشگاهی متداول، مانند توزیع دانه‌بندی و حدود اتربرگ، جهت شناسایی خاک‌های واگرا قابل‌استفاده نیستند؛ بنابراین، برای این منظور آزمایش‌های خاصی پیشنهاد شده است. به علت عدم شناخت کامل ماهیت فیزیکی- شیمیایی پدیده واگرایی و مکانیسم پیچیده آبشستگی، تا به حال آزمایش یگانه‌ای که بتوان به کمک آن میزان واگرایی خاک‌های رسی را تشخیص داد ابداع نشده است. آزمایش‌های آزمایشگاهی متداول عبارت از: آزمایش کلوخه خاک در آزمایشگاه، آزمایش هیدرومتری دوگانه یا واگرایی، آزمایش سوراخ سوزنی یا پین‌هول و آزمایش‌های شیمیایی است. بهبود خصوصیات خاک واگرا معمولاً با افزودن مواد شیمیایی به خاک و مواردی با افزودن این مواد به آب صورت می‌پذیرد. از مهمترین این مواد: آهک، سیمان، سولفات آلومینیوم، ژیپس و سولفات آهن است (Das, 1990). نتایج تحقیقات انجام شده در سال‌های اخیر نشان داده است که افزایش مقادیر کم سیمان به خاک بستر (۰/۸ تا ٤ درصد) باعث تثبیت خاک واگرا می‌شود. این عمل با جایگزینی یون‌های کلسیم آزاد موجود در سیمان پرتلند و نیز با ایجاد خاصیت چسبندگی ناشی از هیدراتاسیون سیمان، ذرات رس واگرا را به‌خوبی تثبیت نموده و خاصیت فرسایش‌پذیری آن را به میزان قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. مخلوط‌های خاک سیمان حاصل‌شده به‌خوبی قادر به تحمل جریان آب با سرعت‌های تا ۲ متر در ثانیه نیز بوده است (Alper et al., 2006). در اثر اختلاط سیمان با خاک دو واکنش پایه اما پیچیده بدین شرح معلوم می شود: اول، بهبود نسبتاً سریع و یا فوری به دلیل تبادل کاتیونی و دوم، واکنش پوزولانی که در بازه زمانی از چند دقیقه تا چند ماه و یا بیشتر رخ می‌دهد. هنگامی که سیمان با خاک‌های رسی با چسبندگی کم با هم مخلوط می‌شوند و در معرض رطوبت قرار می‌گیرند، واکنش‌های شیمیایی زیادی رخ داده که شامل تبادل کاتیونی، کلوخه شدن، واکنش پوزولانی و کربناسیون می‌باشد (اوحدی و همکاران، ۱۳۹۳). تبادل کاتیونی و کلوخه شدن جزء واکنش-های اولیه هستند که بلافاصله بعد از اختلاط صورت می-گیرند. در جریان این واکنش‌ها کاتیون‌های یک ظرفیتی واقع در لایه دوگانه پولک‌های رس با کاتیون دوظرفیتی کلسیم جایگزین می‌شود. در مطالعاتی که صورت گرفته است، جرج و همکاران (۱۹۹۲) به مطالعه تأثیر دما بر فرآیند تثبیت خاک با آهک پرداختند و بر اساس نتایج این پژوهشگران، دما موجب کاهش در نشانه‌ی خمیری همراه با افزایش در حد خمیری و کاهش در حد روانی شده است. در مطالعات دیگری اوحدی و همکاران (۲۰۱٤)، به مطالعه‌ی تحکیم پوزولانی رس نرم تثبیت‌شده با آهک و سیمان پرداختند و سه جنبه‌ی مهم از تثبیت خاک با آهک و سیمان که شامل: ۱) تعیین درصد بهینه‌ی آهک و سیمان برای تثبیت خاک، ۲) ارائه واژه فنی جدید به دانش ژئوتکنیک با عنوان تحکیم پوزولانی که در پایدارسازی رس نرم با آهک و سیمان رخ

می‌دهد و ۳) ارائه یک معیار علمی برای تعیین درصد بهینه ماده تثبیت‌کننده با دانش تنش پیش‌تحکیمی و شاخص تورم را مورد بررسی قرار دادند. همچنین اوحدی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی نرخ رشد و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک واگرا و آهک در کوتاه مدت و بلند مدت از نظر زیرساختاری و درشت‌ساختاری و همچنین تعیین میزان آهک مصرفی در گذشت زمان و تاثیر آن بر پارامترهای مکانیکی پرداختند. از مهمترین نتایج تحقیق می‌توان به ارایه یک معیار ساده برای شروع واکنش‌های پوزولانی وتعیین میزان آهک مصرف شده در مدت واکنش های پوزولانی بر اساس pH و ضریب هدایت الکتریکی (EC) اشاره نمود. اوحدی و همکاران (۱۳۹۳) با نگرشی ویژه به تغییرات ریزساختاری و حل شدگی قله‌های اصلی کانی‌های رسی و تشکیل ترکیبات جدید پرداختند. خاک واگرای مورد مطالعه در این پژوهش با آهک شکفته مخلوط شده و بعد از پایان دوره عمل آوری، نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی قرار گرفته و میزان تغییرات پتانسیل واگرایی و بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک ارزیابی شده و همچنین روند تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها شامل حل شدگی کانی‌های رسی و تشکیل ترکیبات جدید و اندرکنش خاک واگرا و آهک تحلیل شده است. همچنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و تحکیم، نشان دهنده افزایش مقاومت و کاهش میزان ضریب فشردگی است. حسنلو و همکاران (۱۳۹۰) تاثیر پارامترهای شیمیایی را بر میزان واگرایی خاک‌های رسی مورد بررسی قرار دادند و در این بررسی به این نتیجه رسیدند که در خاک‌های واگرا میزان ESP بزرگتر از ۲۰ و میزان SAR بزرگتر از ۱۰ بوده و همچنین با افزایش میزان SAR، هدایت الکتریکی و pH افزایش می‌یابد.

استفاده از مواد تثبیت کننده بستگی به شرایط فنی و اقتصادی دارد. با توجه به بالا بودن سطح آب زیرزمینی در محل انجام پژوهش و وجود یون‌های خورنده در آب منطقه میناب، استفاده از آهک برای تثبیت خاک منطقه توصیه نمی‌شود و به جای آن سیمان استفاده گردید. تحقیقات گذشته نشان داده که خاک سرخ موجود در معادن جزیره هرمز استان هرمزگان دارای اکسیدآهن فراوان می‌باشد. استفاده ازاین خاک جهت تثبیت خاک واگرای میناب علاوه بر کاهش واگرایی خاک از نظر اقتصادی به صرفه و دارای اثرات زیست محیطی ناچیزی می‌باشد. در این نوشتار برای اولین بار تلاش شده با افزودن خاک سرخ جزیره هرمز به خاک واگرا، پتانسیل واگرایی خاک کاهش پیدا کند.

## ۲- مواد و روش

خاک آزمایش شده در این تحقیق از ابتدای جاده کمربندی شهرستان میناب واقع در ۱۰۰ کیلومتری جنوب شرق بندرعباس در استان هرمزگان تهیه شده است. مطالعات پیشین و همچنین بازدیدهای محلی نشانه‌های واگرایی خاک را بصورت فروکش نمودن نقاط مختلف زمین، خلل و فرج و حفره‌هایی با دیواره های عمودی و ترک خوردگی و کانال های تنگ عمیق طبیعی در مناطقی از منطقه مورد مطالعه نشان می دهد (رهنما و همکاران[1]، ۱۳۹۲ و رهنما و همکاران[2]، ۱۳۹۲). در شکل ۱ نشانه های واگرایی در خاک منطقه مورد مطالعه به تصویر کشیده شده است. منطقه مطالعه شده در محدوده در نظر گرفته برای اجرای سازه‌های صنعتی است. با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و احتمال وقوع پدیده واگرایی و فرسایش خاک در تراز شالوده سازه‌ها، بهبود خصوصیات مهندسی این خاک مورد مطالعه بوده است. نمونه‌های بدست آمده جهت مطالعات آزمایشگاهی از اعماق نهایتاً ۱ متری و از چاهک‌های دستی و بصورت دست خورده تهیه شده‌اند.

**شکل ۱. حفرات ایجاد شده ناشی از واگرایی خاک در پشت سد میناب**

جهت تثبیت خاک واگرای مورد مطالعه (با علامت اختصاری M) از خاک سرخ موجود در معدن جزیره هرمز در استان هرمزگان (با علامت اختصاری R) به علت بالا بودن اکسید آهن استفاده شد. علاوه بر خاک سرخ در این تحقیق از ترکیبی از خاک سرخ و سیمان (با علامت اختصاری C) نیز جهت تثبیت استفاده گردیده است. به دلیل بالا بودن سطح آب زیر زمینی در استان هرمزگان و وجود یون سولفات در آب و خورندگی این یون، استفاده از آهک جهت تثبیت خاک‌های واگرا در این منطقه توصیه نمی‌شود. در این نوشتار به جای آهک، سیمان جهت تثبیت به همراه خاک سرخ استفاده شده است. بخش بزرگی از آزمایش‌های انجام شده در این نوشتار براساس استاندارد ASTM و دستورالعمل انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک زیست محیطی دانشگاه مک گیل کانادا انجام شده است (EPA, 1983 و ASTM, 1992). شناسایی کامل و دقیق خاک‌های واگرا در محل منوط به انجام آزمایش‌های مخصوص است که بدون آنها تشخیص واگرایی ممکن نیست. آزمایش‌های انجام شده در این نوشتار برای ارزیابی واگرایی شامل آزمایش‌های فیزیکی: پین هول، هیدرومتری مضاعف و آزمایش کرامپ (رحیمی و همکاران، ۱۳۸۳) و آزمایش‌های شیمیایی (بازرگان و اسماعیلی، ۱۳۸۹) است.

آزمایش هیدرومتری دوگانه بر اساس استاندارد ASTMD4221 انجام شد. در این آزمایش ابتدا دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتری استاندارد (با استفاده از همزن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده ساز) انجام شده و سپس نمونه دیگری از همان خاک بدون همزن و ماده پراکنده ساز آزمایش می‌شود. درصد واگرایی به صورت نسبت ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در آزمایش دوم به درصد ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در آزمایش اول تعریف می‌شود. آزمایش کرامپ بر اساس استاندارد ASTM D6572 انجام شده است. ابتدا تکه کوچکی از خاک (به قطر ٦ تا ۹ میلی متر) در داخل ظرفی حاوی ۱۵۰ سانتیمتر مکعب آب مقطر انداخته می‌شود. نمونه تدریجاً شروع به جذب آب می‌نماید. پس از پنج تا ده دقیقه وضعیت نمونه از نظر تمایل ذرات کلوئیدی به جدا شدن از نمونه و شناور شدن در آب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و واکنش ذرات خاک در مقابل آب به یکی از صورتهای بدون واکنش، واکنش ضعیف، واکنش متوسط و واکنش شدید بیان می‌شود. آزمایش پین هول بر اساس استاندارد ASTM D4647 انجام شده است. جهت انجام این آزمایش ابتدا نمونه خاک در استوانه شیشه‌ای متراکم می گردد. ارتفاع نمونه مورد آزمایش ۳۸ میلیمتر می باشد. سپس به کمک سوزنی به قطر یک میلیمتر

سوراخی در امتداد محور طولی نمونه ایجاد می‌شود. نمونه به صورت افقی قرار گرفته و تحت بارهای آبی ۵۰، ۱۸۰، ۳۸۰ و ۱۰۲۰ میلیمتر و در زمان مشخص میزان آب خروجی و رنگ آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اگر نمونه خاک تحت بار آبی ۵۰ میلیمتر به آسانی شسته شود و محلول کلوییدی از آن خارج گردد، خاک واگرا می‌باشد. در صورتی که نمونه تحت بار آبی ۵۰ تا ۱۸۰ میلیمتر به آهستگی شسته شود و آب خارج شده گل آلود باشد، خاک نیمه واگراست و اگر نمونه مورد آزمایش تحت بار ۲۸۰ تا ۱۰۲۰ میلیمتر شسته نشده و آب خارج شده از آن زلال باشد، خاک غیر واگرا است. تغییر میزان املاح آبی که در خاک جریان دارد در نتایج تاثیر زیادی دارد در نتیجه در آزمایش پین هول از آب مقطر استفاده شده است. آزمایش‌های شیمیایی در این نوشتار شامل آزمایش‌هایی است که بر روی آب منفذی خاک جهت تعیین کاتیون‌های کلسیم، منیزیم ، سدیم و پتاسیم انجام شده است (بیچرانلو، ۱۳۸۷). بدین صورت که نمونه‌های خاک بعد از گذراندن مراحل خشک شدن و شکستن (در صورت لزوم) با افزودن آب مقطر به حد روانی رسانده می‌شود. خمیر فوق درون ظرف پلاستیکی در دار به مدت ۲٤ ساعتی نگهداری می‌شود تا بین نمک‌های موجود در آب منفذی تعادل برقرار شود. بعد از زمان طی شده، آب منفذی؛ خمیر خاک با کمک سیستم خلاء، قیف بوخنر و کاغذ صافی جدا می شود. قبل از صاف کردن خمیر با کمک کاردک آنرا خوب بهم زده تا خمیری یکدست بدست آید. آب خارج شده از نمونه به نام شیره یا عصاره اشباع موسوم است. مهمترین کاتیون‌های فلزی شامل کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم با آزمایش بر روی عصاره اشباع تعیین می‌شود. در این نوشتار پس از انجام آزمایش‌های شیمیایی مقادیر کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم محاسبه گردیده است.

در جدول ۱ نتایج ٤ آزمایش هیدرومتری مضاعف، کرامپ، پین هول و آزمایش شیمیایی بر روی نمونه‌های خاک میناب نشان داده شده است. بر اساس نتایج آزمایشات می‌توان خاک منطقه میناب را به عنوان نیمه واگرا–واگرا در نظر گرفت.

**جدول ۱. نتایج آزمایشات فیزیکی و شیمیایی بر نمونه خاک واگرای مطالعه شده**

| آزمایش | نتیجه | ارزیابی از واگرایی خاک |
|---|---|---|
| هیدرومتری | نسبت | واگرا |
| دوگانه | واگرایی=٤٥ | |
| کرامپ | واکنش متوسط | نیمه واگرا |
| پین هول | ND4 | نیمه واگرا |
| شیمیایی | ESP=78.13 | واگرا |

در جدول ۲ درصد ترکیبات شیمیایی سیمان و خاک سرخ هرمز که به عنوان تثبیت کننده‌ی خاک واگرای میناب در این پژوهش استفاده شده‌اند، نشان داده شده است. $Fe^{+3}$ و $Ca^{+2}$ به ترتیب یون‌های غالب در خاک سرخ و سیمان می‌باشند. در نتیجه با تبادل کاتیونی $Na^{+}$ موجود در خاک واگرای میناب با $Fe^{+3}$ و $Ca^{+2}$ خاک سرخ و سیمان خواص خمیری و پتانسیل واگرایی به شدت کاهش می‌یابد. در جدول ۳ برخی از مشخصات ژئوتکنیکی و فیزیکی نمونه خاک واگرای مطالعه شده در این پژوهش ارایه شده است. برای تعیین مقدار خاک سرخ و سیمان یکسری آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام شده است.

**جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک سرخ هرمز و سیمان مورد استفاده قرار گرفته**

| $K_2O$ | $Na_2O$ | MgO | CaO | $Fe_2O_3$ | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | Parameters / Product type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.72 | 0.26 | 1.28 | 63.35 | 4.21 | 5.01 | 21.53 | Cement (C) |
| 0.01 | 0.01 | 0.11 | 1.15 | 68 | 4.75 | 23.80 | Red Soil (R) |

**جدول۳. برخی از مشخصات ژئوتکنیکی نمونه خاک واگرای مطالعه شده**

| Physical properties of Minab soil | Quantity measured | References for method of measurement |
|---|---|---|
| Clay (%) | 51 | ASTM, D422-63 |
| Classification | CL | ASTM, D3282 |
| Plasticity Index | 8 | ASTM, D4318 |
| Plasticity Limit | 21 | ASTM, D4318 |
| Liquid Limit | 29 | ASTM, D4318 |
| Dry Unite weight | 16.8 | ASTM D7263 |
| Moisture | 2.6 | ASTM D2216 |

سطح ذرات کانی‌های رس دارای بار منفی است، این بار منفی عمدتاً در اثر جایگزینی اتم‌های سیلیسیوم و آلومینیوم به وسیله اتم‌هایی با ظرفیت کمتر بوجود می‌آید. وجود بار منفی در سطح کانی‌های رس باعث جذب یون‌های مثبت دیگر و جایگزینی می‌شوند (Al-Rawas et al., 2005). این پدیده به تبادل یون‌های مثبت یا تبادل کاتیونی موسوم است. بافت قالب خاک سرخ دارای اکسید آهن می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های لازم برخاک تثبیت شده با درصدهای مختلف خاک سرخ و سیمان، مقادیر ۳، ٦ ، ۱۰ درصد خاک سرخ و همچنین ۱۰ درصد خاک سرخ به همراه ۱/۵، ۳ و ۵ درصد سیمان به صورت خشک به نمونه‌ها اضافه شده و سپس به خوبی مخلوط شده است. پس از اختلاط کامل، نمونه‌ها را به رطوبت در محل رسانده می‌شود. برای انجام واکنش نمونه‌ها به مدت ١٤ روز نگهداری می‌شوند. بر این اساس آزمایش-های دانه‌بندی، اتربرگ، هیدرومتری ساده و مضاعف، پین هول و شیمیایی بر روی ترکیب‌های مختلف خاک واگرا– خاک سرخ و خاک واگرا–خاک سرخ و سیمان بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است.

## ۳- نتایج و بحث

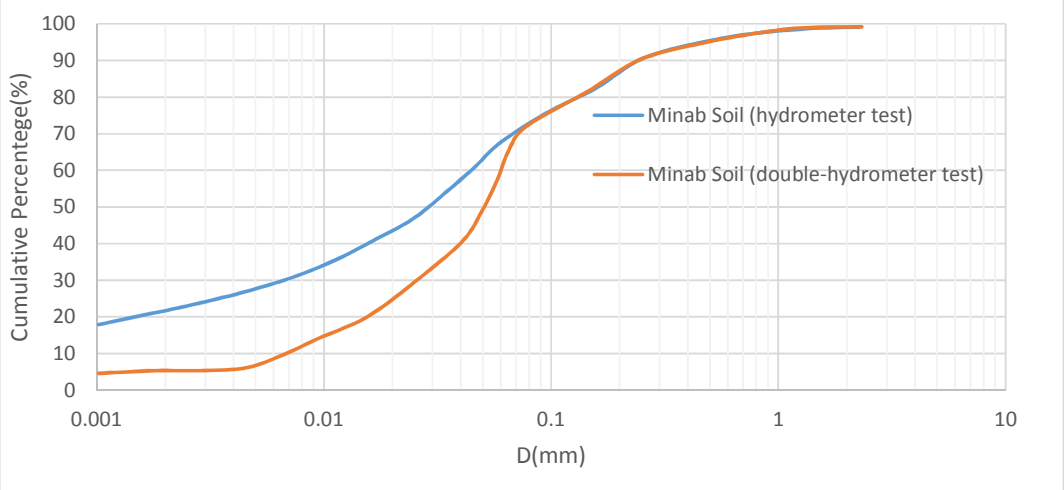
بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه خاک منطقه مورد مطالعه واگراست. بر اساس مطالعه پژوهشگران پتانسیل واگرایی با وجود یون سدیم به عنوان کاتیون اصلی نسبت مستقیم دارد (Mitchell, 2005) و بر طبق نتایج ارایه شده در جدول ٤ و همچنین معادله ارایه شده به وسیله شرارد و همکاران (۱۹۷۷) با توجه به حضور زیاد کاتیون $Na^+$ میزان درصد سدیم تبادلی (پتانسیل واگرایی) بر اساس معادله (۱) برای نمونه خاک میناب در جدول ٤ ارایه گردیده است.

$$ESP = \frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} = \frac{Na}{TDS} * 100 \qquad (۱)$$

**جدول٤. نتایج آنالیز شیمیایی بر نمونه خاک واگرای مطالعه شده (خاک میناب)**

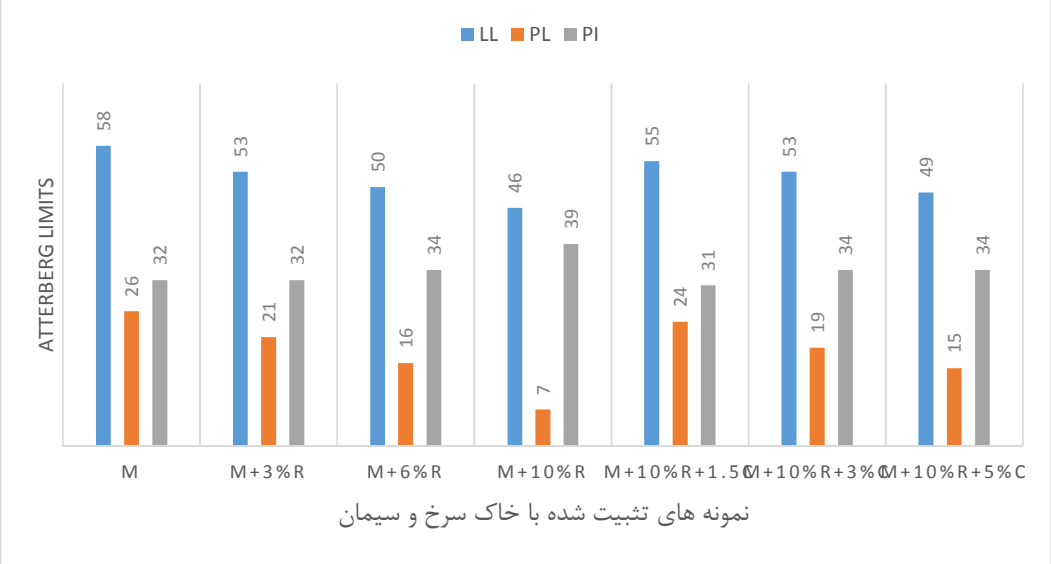
| Parameters | Na | K | Ca | Mg | TDS | ESP | نتیجه بر اساس معیار شرارد |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Meq/lit | | | | | | |
| | ۱۷۵,٤ | ۷,۲۱ | ۱۹,۳ | ۲۲,٦ | ۲۲٤,۵۱ | ۷۸,۱۳ | واگرا |

در شکل ۲ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه رسی میناب ارایه شده است. در این روش آزمایش هیدرومتری در دو مرحله به کمک محلول پراکنده ساز و همزن و بدون محلول پراکنده ساز و همزن انجام شده است. اختلاف دو نمودار در قطرهای کمتر از ۰/۰۸ میلیمتر نشان می‌دهد که نمونه مورد مطالعه بدون محلول پراکنده ساز به خوبی در آب مقطر پراکنده نمی‌شود. از آنجا که بر اساس نتایج جدول ۲ بیش از ۵۵٪ کاتیون تبادلی نمونه مورد نظر از نوع کاتیون سدیم می‌باشد، پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حضور غالب کاتیون سدیم در آب حفره‌ای از دلایل اصلی برای حصول درصد واگرایی می‌باشد. بر اساس پژوهش‌های موجود خاک‌های با درصد سدیم تبادلی بیش از ٤۰٪ قابلیت روانگرایی دارند.




**شکل۲. نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی خاک واگرا مورد مطالعه**

در شکل ۳ منحنی تغییرات خمیری نمونه‌های تثبیت شده با خاک سرخ و سیمان نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده با افزایش درصد خاک سرخ حد روانی کاهش و دامنه خمیری افزایش می‌یابد. این رفتار مشاهده شده را می‌توان به حل شدگی بخشی از کانی‌های رسی و جانشینی یون‌های آهن خاک سرخ با یون‌های سدیم و پتاسیم موجود در لایه دوگانه پولک رسی نسبت داد (Al-Mukhtar et al., 2010).




**شکل۳. منحنی تغییرات حدود اتربرگ نمونه‌های اصلاح شده با خاک سرخ و سیمان**

در جدول ۵ نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی خاک میناب با درصدهای مختلف خاک سرخ و سیمان نشان داده شده است. خاک میناب ابتدا با ۶،۳ و ۱۰ درصد خاک سرخ تثبیت و سپس با ترکیب ۱۰ درصد خاک سرخ و ۱،۵، ۳ و ۵ درصد سیمان تثبیت می‌شود. آزمایش یکبار با استفاده از عامل پراکنده ساز و بار دیگر بدون استفاده از آن انجام می‌شود. بر اساس این آزمایشات پارامتری به نام نسبت واگرایی که حاصل نسبت ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در آزمایش بدون پراکنده ساز به ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در آزمایش با ماده پراکنده ساز می‌باشد، تعریف می‌شود. گرچه با افزایش درصد خاک سرخ نسبت واگرایی شروع به کاهش می‌کند اما با افزودن ۱۰ درصد خاک سرخ، خاک به حالت نیمه واگرا در می‌آید. این کاهش واگرایی به دلیل حضور یون آهن سه ظرفیتی در خاک سرخ می‌باشد. با افزودن سیمان به

خاک واگرا با ۱۰ درصد خاک سرخ، نسبت واگرایی به دلیل حضور یون کلسیم باز هم کاهش می‌یابد و خاک در محدوده غیر واگرا قرار می‌گیرد.

**جدول ۵. نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر نمونه‌های اصلاح شده با خاک سرخ و سیمان**

| مشخصات خاک | نسبت واگرایی | نتیجه آزمایش |
|---|---|---|
| M | ٤٩ | واگرا |
| M+3%R | ٤٨ | واگرا |
| M+6%R | ٣٣ | نیمه واگرا |
| M+10%R | ٢٧ | نیمه واگرا |
| M+10%R+1.5%C | ٢٥ | غیر واگرا |
| M+10%R+3%C | ٢٢ | غیر واگرا |
| M+10%R+5%C | ٢٠ | غیر واگرا |

جدول ٦ نتایج آزمایش پین هول بر روی نمونه‌های خاک تثبیت شده با خاک سرخ و سیمان را نشان می‌دهد. با افزایش درصد خاک سرخ پتانسیل واگرایی کاهش می‌یابد و در نهایت با ۱۰٪ وزنی خاک سرخ خاک رفتار غیر واگرا از خود نشان می‌دهد. با افزودن سیمان پتانسیل واگرایی به شدت کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش پین هول نشان میدهد که با مقدار بهینه ۱۰٪ خاک سرخ و بدون استفاده از سیمان، خاک رفتار غیر واگرا از خود نشان می‌دهد در حالی که بر اساس نتایج آزماش هیدرومتری دوگانه خاک تثبیت شده با ۱۰ در صد خاک سرخ، رفتار نیمه واگرا از خود نشان می‌دهد و پس از اضافه کردن سیمان رفتار غیر واگرا می‌شود.

**جدول ٦. نتایج آزمایش پن هول بر روی نمونه‌ای اصلاح شده با خاک سرخ و سیمان**

| مشخصات نمونه | نتیجه آزمایش | رده بندی |
|---|---|---|
| M | D1 | کاملا واگرا |
| R | ND1 | غیر واگرا |
| M+3%R | ND4 | متوسط واگرا |
| M+6%R | ND3 | کمی واگرا |
| M+10%R | ND2 | غیر واگرا |
| M+10%R+1.5%C | ND2 | غیر واگرا |
| M+10%R+3%C | ND1 | غیر واگرا |

در جدول ۷ درصد ترکیبات نمونه‌های خاک میناب تثبیت شده با درصدهای مختلف خاک سرخ و سیمان نشان داده شده است. افزایش درصد خاک سرخ به دلیل آنکه بافت خاک سرخ اکسید آهن است، باعث کاهش درصد سدیم شده و در نتیجه میزان واگرایی خاک را کاهش می‌دهد. افزودن سیمان به خاک میناب تثبیت شده با خاک سرخ گرچه تاثیر چشم گیری بر میزان یون سدیم ندارد اما باعث افزایش میزان یون کلسیم می‌شود. وجود یون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم در خاک باعث کاهش واگرایی می‌شود. کما اینکه در پروژه‌های متعدد جهت کاهش واگرایی از درصدهای مختلف آهک و سیمان استفاده می‌شود. استفاده همزمان از خاک سرخ و سیمان باعث می‌شود که یون‌های $Ca^{+2}$ و $Fe^{+3}$ موجود در سیمان و خاک سرخ طی فرآیند تبادل کاتیونی جایگزین $Na^{+}$ شده و در نتیجه نیروهای واندروالسی موجود در خاک کاهش یابد.

**جدول۷. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی نمونه‌های اصلاح شده با خاک سرخ و سیمان**

| Mg(meq/L) | Ca(meq/L) | Ka(meq/L) | Na(meq/L) | Soil | Number |
|---|---|---|---|---|---|
| 29.5 | 1012 | 4.4 | 99.1 | M | 1 |
| - | - | - | - | R | 2 |
| 27.8 | 934 | 31 | 81.1 | M+3%R | 3 |
| 23.3 | 878 | 28 | 58.6 | M+6%R | 4 |
| 20.6 | 792 | 16 | 43.2 | M+10%R | 5 |
| 21 | 869 | 17 | 43 | M+10%R+1.5%C | 6 |
| 21.5 | 935 | 15 | 40.2 | M+10%R+3%C | 7 |
| 21.8 | 1005 | 13 | 35.2 | M+10%R+5%C | 8 |

## ٤- نتیجه‌گیری

نتایج گرفته شده در این پژوهش را می توان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱-خاک سرخ جزیره هرمز با توجه به محتوای بالای اکسید آهن توانایی کاهش پتانسیل واگرایی خاک‌های مستعد این پدیده را دارد.

۲- بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری افزودن ۱۰ درصد خاک سرخ به خاک واگرا باعث از بین رفتن پتانسیل واگرایی می‌شود. این در حال است که بر اساس نتایج آزمایش پین هول افزودن ۱۰ درصد خاک سرخ به همراه ۱,۵ درصد سیمان باعث از بین رفتن پتانسیل واگرایی می شود. دلیل این پدید تبادل کاتیونی یون های $Fe^{+3}$ و $Ca^{+2}$ موجود در خاک سرخ و سیمان با یون $Na^{+}$ موجود در خاک واگرا می‌باشد.

۳-افزودن خاک سرخ و سیمان به خاک واگرا باعث افزایش رفتار خمیری می‌شود. . این رفتار مشاهده شده را می‌توان به حل شدگی بخشی از کانی‌های رسی و جانشینی یون‌های آهن خاک سرخ و کلسیم سیمان با یون‌های سدیم و پتاسیم موجود در لایه دوگانه پولک رسی نسبت داد.

٤-آنالیز شیمیایی نمونه‌های تثبیت شده نشان داد افزودن خاک سرخ باعث کاهش درصد سدیم موجود در خاک واگرا، که مهمترین عامل واگرایی می‌باشد، شده است. افزودن سیمان نیز همزمان باعث افزایش درصد یون کلسیم و کاهش یون سدیم وجود در نمونه می‌شود. در نمونه‌های تثبیت شده با سیمان واکنش پوزولانی رخ داده علاوه بر تبادل کاتیونی، باعث کاهش پتانسیل واگرایی می‌شود.

## ٥- مراجع


-Alper, S., Gozde, I., Recep, Y.H., Kambiz, R., (2006), "Utilisation of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay", Building and Environment, 42 (2), pp. 150–155.

-Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., Alcover, J.F., (2010), "Behaviour and Mineralogy Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 20 °C", Applied Clay Science, No. 50, pp. 191-198.

-Al-Rawas, A.A. Hago, A.W., Al-Sarmi, H, (2005), "Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman", Building and Environment, 40 (5), pp. 681–687.

-American Society for Testing and Materials, (1992), "Annual Book of ASTM Standards", Philadelphia, 4.

-Das, B. M., (1990), "Principle of foundation engineering", PWS-KENT publishing company, Boston.

-EPA, (1983), "Process design manual, land application of municipal sludge, Municipal Environmental Research Laboratory," EPA-625/1-83-016, U.S. Government Printing Offices, New York.

-George, S, Z, Ponniah, D, A, And Little, J, A, (1992), "Effect of ،temperature on Lime-Soil Stabilization", Construction & Building Materials, Vol. 6, No. 4, pp. 247-252.

-Mitchell, I. V., (2005), "Pillared Layered Structures: Current Trends and Applications", Elsevier Science Publishers, New York, USA.

-Ouhadi, V. R. and Goodarzi, R. V., (2005), "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum", Engineering Geology, Vol. 85, pp. 91-101.

-Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Amiri, M. and Ouhadi, M.H., (2014), "Pozzolanic Consolidation of Stabilized Soft Clays", Applied Clay Science, No. 95, pp. 111-118.

-Sherard, J. I., Dunnigan, L. P. & Decher, R. S., (1976), "Identification and nature of dispersive soil", Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 102, pp. 287-301.

-Sherard, J. I., Dunnigan, L. P. & Decher, R. S., (1977), "Some engineering problems with dispersive soils", ASTM, STP, No. 623: pp. 3-12.

-اوحدی، و.، امیری، م.، حمیدی، ص.، (۱۳۹۳)،" بهسازی خاک های واگرا با آهک با نگرش ویژه به کاهش شدت قله‌های اصلی کانی‌های رسی در پراش پرتو ایکس"، مجله علمی- پژوهشی عمران مدرس، دوره چهاردهم، شماره ۲.

-اوحدی، و.، امیری، م.، زنگنه، م.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی ریز ساختاری میزان مصرف آهک و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک واگرای تثبیت شده با آهک"، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، دوره شانزدهم، شماره ۱.

-بازرگان، ج.، اسمعیلی.، د.، (۱۳۸۹)، "ارزیابی و اصلاح شیمیایی تشخیص پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی"، نشریه زمین شناسی مهندسی، شماره ۲.

-بیچرانلو.، ر.، (۱۳۸۷)، "بررسی معیار شیمیایی شرارد به لحاظ نقش رطوبت عصاره‌گیری در شناسایی واگرایی خاک‌ها"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

-حسنلو، م.، محمود خانی، ب.، (۱۳۹۰)، "بررسی تاثیر پارامترهای شیمیایی بر میزان واگرایی خاک‌های رسی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

-رهنما راد، ج.، خوارزمی، م.، انصاری فر، م.، (۱۳۹۲)، "بررسی واگرایی خاک شهر میناب"، هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

-رهنما راد.، ج، انصاری فر.، م.، ترکی زاده.، ع.، و اربابی.، م.، (۱۳۹۲)، "بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی منابع قرضه ریزدانه سد سرنی"، اولین همایش ملی مجازی علوم زمین، ارومیه، انجمن کاوشگران جوان زمین ارومیه،

-رحیمی.، ح.، داورزنی.، ح.، عباسی.، ن.، (۱۳۸۳)، "پدیده واگرایی فیزیکی در خاک‌های غیر چسبنده و معیارهای ارزیابی آن"، مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۵، شماره۳، ۵۴۱-۵۵۰.

-عسکری، ف.ا.، فاخر، ع.، (۱۳۷۲)، " تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک"، دانشگاه تهران.

-فرزانه، ا.، تدین، ف.، (۱۳۸۵)، "شناسایی و کاربرد خاک‌های واگرا در سدهای خاکی"، وزارت نیرو- کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، چاپ دوم.